



(12) **Offenlegungsschrift**  
(10) **DE 196 52 423 A 1**

(51) Int. Cl. 6:  
**H 01 L 29/737**  
H 01 L 21/331  
H 01 L 21/205  
H 01 L 21/223

(21) Aktenzeichen: 196 52 423.7  
(22) Anmeldetag: 9. 12. 96  
(43) Offenlegungstag: 10. 6. 98

**DE 196 52 423 A 1**

- (71) Anmelder:  
Institut für Halbleiterphysik Frankfurt (Oder) GmbH,  
15230 Frankfurt, DE
- (74) Vertreter:  
Heitsch, W., Pat.-Anw., 14778 Jeserig
- (72) Erfinder:  
Lippert, Gunther, Dr., 15230 Frankfurt, DE; Osten,  
Hans-Jörg, Prof. Dr., 15299 Müllrose, DE;  
Heinemann, Bernd, 15234 Frankfurt, DE
- (55) Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht  
zu ziehende Druckschriften:  
DE 195 33 313 A1  
DE 36 30 282 A1  
US 55 57 118  
US 53 87 807  
US 53 60 986  
US 48 85 614  
EP 05 81 369 A1  
EP 05 52 561 A3  
EP 05 52 561 A2  
PRINZ, E.J., et.al.: The Effects of Base Dopant  
Outdiffusion and Undoped  $Si_{1-x}Ge_x$  Junction  
Spacer Layers in  $Si/Si_{1-x}Ge_x/Si$   
Heterojunction Bipolar Transistors. In: IEEE  
Elektron Device Letters, Vol. 12, No. 2, Feb. 1991,  
S.42-44;

LIEFTING, Reinoud, et.al.: Improved Device  
Performance by Multistep or Carbon Co-Implants.  
In: IEEE Transactions on Electron Devices,  
Vol. 41, No. 1, Jan. 1994, S.50-55;  
LOMBARDO, S., et.al.: Reduction of secondary  
defect  
density by C and B implants in  $Ge_xSi_{1-x}$   
layers formed by high dose Ge implantation in  
(100) Si. In: Appl. Phys. Lett. 62, 19,  
10. May 1993, S.2335-2337;  
HARAME, D.L., et.al.: Si/SiGe Epitaxial-Base  
Transistors-Part I: Materials, Physics, and  
Circuits. In: IEEE Transactions on Electron  
Devices, Vol. 42, No. 3, March 1995, S.455-482;  
SHAFI, Z.A., et.al.: Analysis and modeling of  
the base currents of  $Si/Si_{1-x}Ge_x$   
heterojunction bipolar transistors fabricated in  
high and low oxygen content material. In: J. Ap  
pl. Phys. 78, 4, 15. Aug. 1995, s.2823-2829;  
HERBOTS, Nicole, et.al.: The onset of sec  
ondary phase precipitation during synthesis of  
heteroepitaxial  $Si_{1-x-y}Ge_xC_y$  on  
 $Si(100)$ . In: Appl. Phys. Letters, Bd. 68, 6, 0  
5. Febr. 1996, S.782-784;  
JP 5-102177 A. In: Patents Abstr  
acts of Japan, E-1417, Aug. 19, 1993, Vol. 17,  
No. 453;

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

- (56) Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor und Verfahren zur Herstellung der epitaktischen Einzelschichten eines derartigen Transistors
- (57) Die Erfindung bezieht sich auf einen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor und ein Verfahren zur Herstellung der epitaktischen Einzelschichten von einem Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor.  
Derart hergestellte Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren besitzen eine erhöhte Transitfrequenz, eine erhöhte maximale Schwingfrequenz und/oder ein verringertes Rauschmaß je nach Anforderungen und Einsatzzweck.  
Auf eine reine Siliziumoberfläche findet eine einkristalline Abscheidung entsprechend dem gewünschten Transistorprofil statt. Der Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor enthält ein zusätzliches, elektrisch nicht aktives Material. Hergestellt wird die Halbleiteranordnung von Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren mittels Epitaxieverfahren. Ein in die Epitaxieschicht eingebrachtes, elektrisch nicht aktives Material bindet Herstellungsdefekte und verringert die Diffusion des Dotanden. Damit lassen sich hochfrequenztaugliche Transistoren auf zwei
- Wegen herstellen: Die Dotierungsdoxis des Basisgebiets wird erhöht und/oder die Basisbreite wird verringert.

**DE 196 52 423 A 1**

## Beschreibung

Die Erfindung bezieht sich auf einen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor und ein Verfahren zur Herstellung der epitaktischen Einzelschichten von einem Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor.

Neben der Verwendung von Galliumarsenid zur Herstellung von Hochfrequenztransistoren finden auch Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren in hochfrequenten Bereichen infolge der geringeren Herstellungskosten zunehmend Anwendung. Solche Transistoren bestehen meist aus einer Schichtenfolge Silizium-Kollektorschicht, p-dotierte Silizium-Germanium-Basisschicht und Emitterschicht.

Die deutsche Offenlegungsschrift DE 43 01 333 A1 beschreibt ein Verfahren zur Herstellung integrierter Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren, bei dem eine Kollektorschicht, eine Basisschicht, eine Emitterschicht und eine Emitteranschlussschicht mittels eines einzigen unterbrechungsfreien Prozesses abgeschieden und gleichzeitig dotiert werden. Dieses Verfahren zur Herstellung hochfrequenztauglicher Transistoren hat den Nachteil, daß eine weitere Erhöhung der Dotierung der Basis mit Fremdatomen eine bei entsprechender Temperatur stattfindende Dotandenausdiffusion, d. h. eine Verbreiterung des Basisgebiets zur Folge hätte. Eine Dotandenausdiffusion hat einerseits eine nichtkonstante Transistorfertigung und andererseits eine Verringerung der Kollektor- und Emitterströme zur Folge. Somit ist eine Verbesserung der Hochfrequenzeigenschaften von Transistoren auf diesem Wege nicht möglich.

Die japanische Patentanmeldung JP 5 102 177 beinhaltet einen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor, dessen Basis mit 5% Kohlenstoff zur Kompensation der durch Germanium eingebrachten mechanischen Spannungen versetzt ist. Solche hohen Kohlenstoffkonzentrationen führen jedoch zu einer starken lokalen Gitterdeformation, die unter anderem die HF-Tauglichkeit der Transistoren einschränkt.

In der Patentschrift US 5,378,901 ist ein Siliziumkarbidtransistor offenbart, bei dem als Basis-, Kollektor- und Emittermaterial Siliziumkarbid verwendet wird. Die hohen Herstellungstemperaturen verhindern die Integration in hochfrequenztaugliche Schaltungen.

Aufgabe der Erfindung ist es, einen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor vorzuschlagen, bei dem die Ausdiffusion des Dotanden des Basisgebiets um mehr als 50% gegenüber herkömmlichen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren reduziert wird. Weiterhin ist es Aufgabe der Erfindung, an sich bekannte Verfahren zur Herstellung der epitaktischen Einzelschichten für einen solchen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor mit einer Silizium-Kollektorschicht, einer dotierten Silizium-Germanium-Basisschicht und einer Silizium-Emitterschicht so auszustalten, daß die üblichen Beschränkungen und hohen Anforderungen für nachfolgende Prozesse verringert werden. Dies betrifft insbesondere die Implantationsdosis und die Temperatur-Zeit-Belastung der epitaktischen Schicht. Derart hergestellte Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren besitzen eine erhöhte Transitfrequenz, eine erhöhte maximale Schwingfrequenz und/oder ein verringertes Rauschmaß je nach Anforderungen und Einsatzzweck.

Diese Aufgabenstellung wird erfundungsgemäß durch die nachfolgende Erfindungsdarlegung gelöst.

Auf eine reine Siliziumoberfläche findet eine einkristalline Abscheidung entsprechend dem gewünschten Transistorprofil statt. Der erfundungsgemäße Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor enthält in mindestens einer der drei Einzelschichten des Transistors, nämlich der Emitterschicht oder der Basisschicht oder der Kollektorschicht,

in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  ein zusätzliches, elektrisch nicht aktives Material, vorzugsweise ein Element der vierten Hauptgruppe. Hergestellt wird die Halbleiteranordnung von Silizium-Germanium-Heterobipolartransistoren mittels Epitaxieverfahren, z. B. durch Gasphasenepitaxie oder Molekularstrahlepitaxie. Durch die der Epitaxie nachfolgenden technologischen Verfahrensschritte kommt es zu Defekten, z. B. Zwischengitteratomen im Halbleiterkristall, die eine Diffusion von Gitterfremdatomen, z. B. Dotanden, begünstigen. Ein wie bereits ausgeführtes, in die Epitaxieschicht eingebrachtes, elektrisch nicht aktives Material bindet diese Defekte und verringert die Diffusion des Dotanden. Die durch das Einbringen eines elektrisch nicht aktiven Materials, vorzugsweise Kohlenstoff, hervorgerufene Gitteränderung ist dabei kleiner als  $5 \cdot 10^{-3}$ . Die Ausdiffusion des Dotanden verringert sich, was eine Verbreiterung des Basisgebiets einschränkt. Damit lassen sich hochfrequenztaugliche Transistoren auf zwei Wegen herstellen: Die Dotierungsdosis des Basisgebiets wird erhöht und/oder die Basisbreite wird verringert. In jedem der möglichen Fällen erhöht sich die Konzentration des Dotanden im Basisgebiet des Transistors auf einen Wert zwischen  $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  bei Verwendung von Bor als Dotand. Damit verringert sich der Innenwiderstand der Basis. Ausgangspunkt für erfundungsgemäßes Verfahren ist die übliche Herstellung eines vorbehandelten Silizium-Substrats. Das Verfahren ist durch folgende Verfahrensschritte gekennzeichnet: Zuerst wird Silizium zur Herstellung der Kollektorschicht aufgedampft. Anschließend wird beim weiteren Siliziumaufdampfen zusätzlich Germanium eingebracht und mittels Gitterfremdatomen dotiert. Als Dotand findet vorzugsweise Bor Verwendung. Durch diesen Verfahrensschritt wird die Basis hergestellt. Nach dem Abschalten des Zuflusses von Germanium und dem Dotierstoff wird die Emitterschicht durch weiteres Aufdampfen von Silizium hergestellt.

Während mindestens einem der bisher aufgeführten Verfahrensschritte wird ein elektrisch nicht aktives Material, vorzugsweise Kohlenstoff in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  während der Herstellung der epitaktischen Schicht hinzugefügt, wobei die dadurch eingebrachte Gitteränderung kleiner als  $5 \cdot 10^{-3}$  infolge der geringen Konzentration des elektrisch nicht aktiven Materials ist. Geringe zusätzliche Gitterverspannung bedeutet keine zusätzliche Quelle von möglichen Gitterdefekten. Zur Herstellung der epitaktischen Schicht finden CVD-Verfahren oder MBE-Verfahren Anwendung. Nach der Epitaxie findet die übliche Weiterprozessierung bis zur Herstellung des endgültigen erfundungsgemäßen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors statt.

Die Merkmale der Erfindung gehen außer aus den Ansprüchen auch aus der Beschreibung und den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich allein oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen schutzfähige Ausführungen darstellen, für die hier Schutz beansprucht wird. Ein Ausführungsbeispiel der Erfindung ist in den Zeichnungen dargestellt und wird im folgenden näher erläutert. In den Zeichnungen zeigen:

Fig. 1 schematischer Schichtaufbau eines Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors,

Fig. 2 Stufen des Verfahrens zur Herstellung der epitaktischen Einzelschichten für einen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor,

Fig. 3 schematischer Schnitt durch einen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor.

In Fig. 1 ist der Schichtaufbau eines erfundungsgemäßen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors, bestehend aus einem dotierten Silizium-Substrat 1, einer undotierten

Silizium-Kohlenstoff-Kollektorschicht 2, einer dotierten Silizium-Germanium-Kohlenstoff-Basisschicht 3 und einer undotierten Silizium-Kohlenstoff-Emitterschicht 4, dargestellt. Der gesamte Schichtaufbau des Transistors inklusive Dotierung des Basisgebiets mit Bor wird mittels Molekularstrahlepitaxie hergestellt.

Gleichzeitig wird bei der Epitaxie – in diesem Ausführungsbeispiel – während der Herstellung aller drei Einzelschichten, der Kollektorschicht, der Basisschicht und der Emitterschicht, Kohlenstoff in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  zugegeben. Dies entspricht einer Kohlenstoffkonzentration zwischen 0,0015% und 1,5%. Dadurch wird eine mögliche Bordiffusion signifikant verringert, so daß die Dotandenausdiffusionsgebiete 5 im Vergleich zu herkömmlichen Transistoren dieses Typs verkleinert werden. Durch erfundungsgemäße Einfügung von Kohlenstoff verringert sich die Diffusionslänge von Bor um mehr als 50% gegenüber der Diffusionslänge, die ohne Hinzufügung von Kohlenstoff auftritt. Es kommt zur Ausbildung eines sehr steilen Borprofiles. Die dadurch verringerte Basisweite hat eine geringere Basislaufzeit zur Folge. Dies ist gleichbedeutend mit einer Erhöhung der Transitfrequenz und der Erhöhung der maximalen Schwingfrequenz bzw. einem verringerten Rauschmaß des erfundungsgemäßen Transistors.

Eine weitere Verbesserung der Hochfrequenztauglichkeit erfundungsgemäßen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors wird durch Erhöhung der Borkonzentration zwischen  $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  in der Basisschicht 3 erreicht.

Zur Herstellung eines solchen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors werden folgende in Fig. 2 dargestellte Verfahrensschritte durchgeführt: Vor dem erfundungsgemäßen Teil des Verfahrens wird ein vorbehandelter Silizium-Substrat in einem Verfahrensschritt A<sub>0</sub> üblicherweise hergestellt. Daran schließen sich die Schritte

A Siliziumaufdampfen zur Herstellung der Kollektorschicht,  
B Siliziumaufdampfen und zusätzliches Einbringen von Germanium und Dotanden zur Herstellung der Basisschicht

C Abschalten von Germanium und Dotierstoff und Siliziumaufdampfen zur Herstellung der Emitterschicht an, wobei während mindestens einem der Verfahrensschritte A bis C Kohlenstoff in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  eingebaut wird und die dadurch eingebrachte Gitteränderung kleiner als  $5 \cdot 10^{-3}$  ist.

Nach der Epitaxie findet eine übliche Weiterprozessierung D statt bis zur Herstellung eines erfundungsgemäßen Silizium-Germanium-Heterobipolartransistors.

Fig. 3 zeigt einen schematischen Schnitt durch einen derart hergestellten Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor. Auf einem hochdotierten Substrat 31 aus Silizium sind durch Epitaxie der undotierte Silizium-Kohlenstoff-Kollektor 32, der undotierte Silizium-Kohlenstoff-Emitter 33 und die mit Bor in einer Konzentration zwischen  $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  dotierte Basis 34 aus Silizium, Germanium und Kohlenstoff aufgewachsen. Weiterhin beinhaltet die Figur die entsprechenden Kontaktgebiete 35 sowie ein Implantgebiet 36. Die Konzentration des Kohlenstoffs in der epitaktischen Schicht beträgt zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$ .

In der vorliegenden Erfindung wurde anhand eines konkreten Ausführungsbeispiels ein Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor sowie ein Verfahren zur Herstellung der epitaktischen Einzelschichten eines solchen Transistors erläutert. Es sei aber vermerkt, daß die vorliegende Erfindung nicht auf die Einzelheiten der Beschreibung im Aus-

führungsbeispiel eingeschränkt ist, da im Rahmen der Patentansprüche Änderungen und Abwandlungen beansprucht werden.

#### Patentansprüche

1. Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor mit einer Silizium-Kollektorschicht, einer dotierten Silizium-Germanium-Basisschicht und einer Silizium-Emitterschicht, dadurch gekennzeichnet, daß ein zusätzliches, elektrisch nicht aktives Material, vorzugsweise ein Element der vierten Hauptgruppe, in mindestens einer der drei Einzelschichten des Transistors, nämlich der Emitterschicht und/oder der Basisschicht und/oder der Kollektorschicht, in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  eingebaut ist und die dadurch eingebrachte Gitteränderung kleiner  $5 \cdot 10^{-3}$  ist.
2. Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß als elektrisch nicht aktives Material Kohlenstoff Verwendung findet.
3. Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Basisschicht mit Bor dotiert ist und bei einer Konzentration des Dotanden im Basisgebiet zwischen  $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  in der Epitaxieschicht eine Kohlenstoffkonzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  vorliegt und dabei die Defektdichte des Transistors kleiner als  $10^4 \text{ cm}^{-2}$  beträgt.
4. Verfahren zur Herstellung der epitaktischen Einzelschichten für einen im Anspruch 1 gekennzeichneten Silizium-Germanium-Heterobipolartransistor mit einer Silizium-Kollektorschicht, einer dotierten Silizium-Germanium-Basisschicht und einer Silizium-Emitterschicht, dadurch gekennzeichnet, daß während der Herstellung von Einzelschichten, nämlich Emitterschicht (4), Basisschicht (3) und Kollektorschicht (2), in mindestens einer dieser Schichten ein zusätzliches, elektrisch nicht aktives Material, vorzugsweise ein Element der vierten Hauptgruppe, in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  beigefügt wird und gleichzeitig die Basisschicht mittels Fremdatomen dotiert wird, wobei die dadurch eingebrachte Gitteränderung kleiner  $5 \cdot 10^{-3}$  ist.
5. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß bei einem Verfahrensschritt (A), nämlich Siliziumaufdampfen zur Herstellung der Kollektorschicht, Kohlenstoff in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  eingebaut wird.
6. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß bei einem Verfahrensschritt (B), nämlich Siliziumaufdampfen und zusätzliches Einbringen von Germanium und Dotanden zur Herstellung der Basisschicht, Kohlenstoff in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  eingebaut wird.
7. Verfahren nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß bei einem Verfahrensschritt (C), nämlich Abschalten von Germanium und Dotierstoff und Siliziumaufdampfen zur Herstellung der Emitterschicht, Kohlenstoff in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  eingebaut wird, wobei die dadurch eingebrachte Gitteränderung kleiner  $5 \cdot 10^{-3}$  ist.
8. Verfahren nach einem der Ansprüche 5 bis 7, dadurch gekennzeichnet, daß Kohlenstoff in einer Konzentration zwischen  $10^{18} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  bei den Verfahrensschritten (A) und (B) oder den Verfahrensschritten (A) und (C) oder den Verfahrensschritten (B)

DE 196 52 423 A 1

5

6

und (C) oder den Verfahrensschritten (A) und (B) und  
(C) eingebaut wird.

9. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche  
4 bis 8, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Herstel-  
lung der Basisschicht (3) als Dotand Bor in einer Kon-  
zentration zwischen  $5 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$  und  $10^{21} \text{ cm}^{-3}$  Ver-  
wendung findet. 5

10. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche  
4 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Herstel-  
lung der epitaktischen Schicht im CVD-Verfahren 10  
durchgeführt wird.

11. Verfahren nach einem oder mehreren der Ansprüche  
4 bis 9, dadurch gekennzeichnet, daß die Herstel-  
lung der epitaktischen Schicht im MBE-Verfahren  
durchgeführt wird. 15

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

**- Leerseite -**

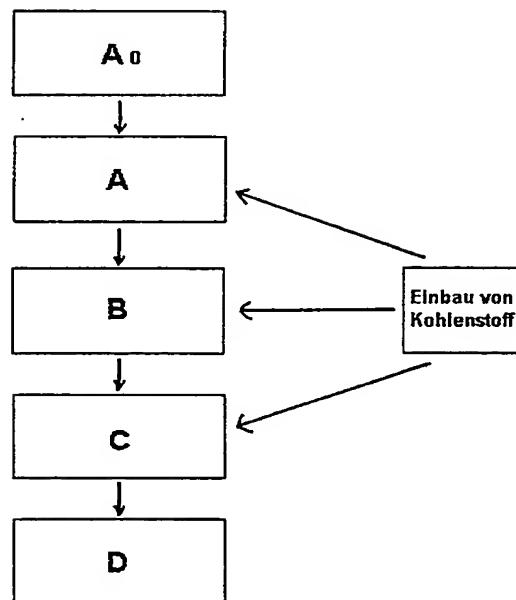


Fig. 2

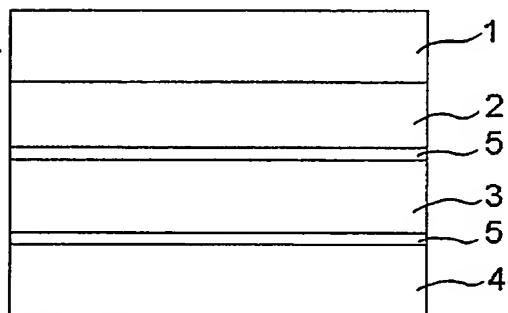


Fig. 1

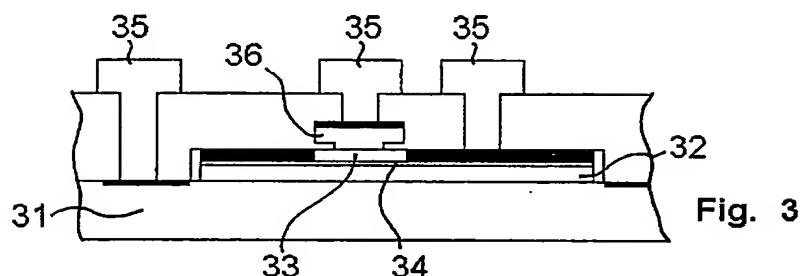


Fig. 3